

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
Калужский филиал

В.В. Шагаев, И.В. Чухраев

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ СВЧ-ДИАПАЗОНА

Методические указания



Калуга 2017

УДК 621.396.67
ББК 32.845
Ш15

Рецензент:

канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры ФН1-КФ МФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
Ю.С. Белов

Утверждено методической комиссией КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
(протокол № 1 от 04.10.2016)

Шагаев В. В.

Ш15 Проектирование линий передачи СВЧ-диапазона: методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Проектирование СВЧ-устройств» / В. В. Шагаев, И. В. Чухраев. – Калуга: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. – 36 с.: ил.

В методических указаниях рассматриваются основные вопросы, связанные с разработкой согласованных волноводных линий, приводятся практические задания и рекомендации по их выполнению.

Указания предназначены для студентов, обучающихся по специальности «Проектирование и технология радиоэлектронных средств», а также по смежным специальностям и направлениям.

УДК 621.396.67
ББК 32.845

© Шагаев В.В., Чухраев И.В., 2017
© Издательство КФ МГТУ
им. Н.Э. Баумана, 2017

ТЕМА № 1. ДИАФРАГМЫ В ВОЛНОВОДЕ

1. Цель упражнения

Освоение метода расчета размеров диафрагмы и координаты её размещения в задаче согласования нагрузки с волноводом.

2. Основные теоретические сведения

Проведем анализ диафрагмы как согласующего элемента волноводного тракта.

Физически любая неоднородность передающей линии приводит к появлению отраженной волны. Поэтому неоднородность можно характеризовать комплексным коэффициентом отражения распространяющейся волны (Γ). Известно, что в двухпроводной линии с распределенными электрическими параметрами неоднородность можно описывать ещё и с помощью комплексного сопротивления (Z). При этом оба параметра связаны между собой соотношением

$$\Gamma = \frac{Z - 1}{Z + 1}.$$

В данной формуле сопротивление неоднородности Z выражено в единицах характеристического сопротивления двухпроводной линии и поэтому является безразмерной величиной.

В двухпроводной линии напряжение между проводниками и ток, протекающий по ним, однозначно определяют сопротивление любого сечения линии. В волновом поперечное сечение представляет собой контур, проходящий по стенкам волновода. При этом электрическое напряжение между двумя произвольными точками этого контура зависит от их положения. Также координатно-зависимым является распределение плотности тока в стенках волновода. В такой ситуации понятие сопротивления становится неоднозначным, а влияние элементов волноводного тракта на распространение сигналов характеризуется только с помощью коэффициента отражения. Тем не менее приведенная выше формула может быть использована для формального введения понятия эквивалентного сопротивления волноводной неоднородности. При этом достигается единство в описании свойств передающих линий разных диапазонов частот и разных конструкций.

Согласование нагрузки с волноводом предполагает введение в волновод дополнительного элемента, устраняющего отраженную волну и не поглощающего энергию падающей волны. Как следует из приведенной выше формулы, условие $\Gamma = 0$ эквивалентно условию $Z = 1$. Тогда согласующий элемент вместе с исходной нагрузкой $Z_n \neq 1$ и

отрезком волновода между ними должны иметь эквивалентное сопротивление $Z = 1$.

Диафрагма может быть использована в качестве согласующего элемента. Причем ее собственное сопротивление (и проводимость), рассчитанное по ее коэффициенту отражения, будет чисто мнимым, и, следовательно, такой элемент не будет поглощать энергию.

Схема замещения волновода с согласующей диафрагмой изображена на рис. 1.1.

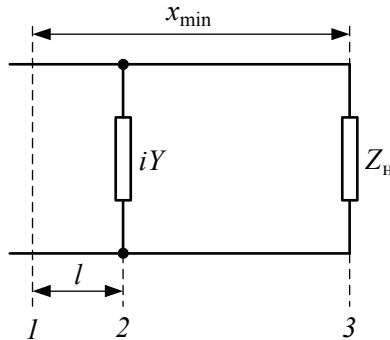


Рис. 1.1. Эквивалентная электрическая схема волновода: 1 – сечение с минимумом амплитуды стоячей волны нагруженного волновода (до установки диафрагмы); 2 – сечение с диафрагмой; 3 – плоскость соединения с нагрузкой; iY – проводимость диафрагмы; Z_n – сопротивление нагрузки

Запишем выражение для напряженности электрического поля в сечении волновода, расположенном на произвольном расстоянии x от нагрузки, как сумму напряженностей полей падающей и отраженной волн (при этом зависимости напряженностей от координат, определяющих местоположение в плоскости сечения, в дальнейшем изложении не используются и для краткости записи не будут указаны):

$$E = E_0 e^{i\omega t + ikx} + E_r e^{i\omega t - ikx}.$$

Здесь ω – круговая частота СВЧ-поля, $k = 2\pi/\lambda_v$ – волновое число, а E_0 и E_r в общем случае являются комплексными величинами. Тогда для амплитуды суммарного поля имеем

$$|E| = \left| E_0 e^{i\omega t + ikx} \right| \left| 1 + \frac{E_r}{E_0} \cdot e^{-2ikx} \right| = |E_0| |1 + \Gamma(x)|,$$

где $\Gamma(x)$ – зависимость коэффициента отражения от координаты вдоль оси волновода:

$$\Gamma(x) = \frac{E_r}{E_0} e^{-2ikx} = \Gamma_0 e^{-2ikx},$$

где $\Gamma_0 = |\Gamma_0| e^{i\varphi_0} = E_r/E_0$ – комплексный коэффициент отражения от нагрузки (т. е. значение $\Gamma(x)$ при $x=0$).

Амплитуда падающей волны $|E_0|$ определяется источником сигнала и от x не зависит. Зависимость же $\Gamma(x)$ целиком связана с множителем e^{-2ikx} . Из анализа зависимости следует неравенство

$$1 - |\Gamma_0| \leq |1 + \Gamma(x)| \leq 1 + |\Gamma_0|.$$

Причем минимум достигается в тех сечениях, где $e^{i\varphi_0 - 2ikx_{\min}} = -1$ и соответственно $\Gamma(x_{\min}) = -|\Gamma_0|$, а максимум – в тех, где $e^{i\varphi_0 - 2ikx_{\max}} = 1$ и $\Gamma(x_{\max}) = |\Gamma_0|$. Поскольку фазовый множитель e^{-2ikx} является периодической функцией от x , то при перемещении вдоль оси волновода амплитуда суммарного поля периодически изменяется между максимальным и минимальным значениями. Поле возникающей при интерференции падающей и отраженной от нагрузки волн с периодической координатной зависимостью амплитуды называют стоячей волной.

Стоячую волну характеризуют параметром, называемым коэффициентом стоячей волны (КСВ, ρ). По определению это отношение максимального значения амплитуды поля к минимальному:

$$\rho = \frac{|E(x_{\max})|}{|E(x_{\min})|} = \frac{1 + |\Gamma_0|}{1 - |\Gamma_0|} = \frac{1 + |\Gamma(x)|}{1 - |\Gamma(x)|}.$$

Очевидно, что $\rho \geq 1$. Как видно из формулы, КСВ полностью определяется отражательными свойствами нагрузки. В частности, для согласованной нагрузки будет $\Gamma_0 = 0$ и соответственно $\Gamma(x) = 0$, так что изменения амплитуды поля вдоль волновода в этом случае нет и $\rho_{\text{согл.}} = 1$.

Как уже отмечалось, в сечении с минимумом амплитуды стоячей волны коэффициент отражения имеет значение $\Gamma(x_{\min}) = -|\Gamma_0|$. Соответствующее эквивалентное сопротивление найдем из уравнения связи между Γ и Z :

$$-|\Gamma_0| = \frac{Z_{\min} - 1}{Z_{\min} + 1}.$$

Тогда

$$Z_{\min} = \frac{1 - |\Gamma_0|}{1 + |\Gamma_0|} = \frac{1}{\rho}.$$

Из данной формулы следует, что Z_{\min} является действительной величиной.

Теперь подробно рассмотрим вопрос о согласовании нагрузки с волноводом с помощью диафрагмы. Используя схему замещения, запишем условие согласования в виде

$$G = G_{in} + iY = 1. \quad (1.1)$$

Здесь G – полная проводимость в сечении с диафрагмой, G_{in} – входная проводимость нагруженной секции волновода за диафрагмой, iY – проводимость диафрагмы (см. рис. 1.1). Выразим G_{in} через проводимость в другом сечении, а именно в том, в котором расположен минимум амплитуды стоячей волны (до установки диафрагмы). Учитывая координатную зависимость $\Gamma(x)$, получим для двух рассматриваемых сечений

$$\Gamma_{\min} = \Gamma_{in} e^{-2ikl}.$$

Выражая Γ_{\min} и Γ_{in} через эквивалентные сопротивления, получим

$$\frac{Z_{\min} - 1}{Z_{\min} + 1} = \frac{Z_{in} - 1}{Z_{in} + 1} e^{-2ikl}.$$

Отсюда, используя формулу Эйлера $e^{ix} = \cos x + i \sin x$, находим связь между проводимостями $G_{in} = 1/Z_{in}$ и $G_{\min} = 1/Z_{\min}$:

$$G_{in} = \frac{G_{\min} + i \tan(kl)}{1 + G_{\min} i \tan(kl)}. \quad (1.2)$$

Уравнение (1.1) и равенство (1.2) позволяют рассчитать Y и l/λ_B . Для удобства расчетов введем обозначение

$$\tan\left(\frac{2\pi l}{\lambda_B}\right) \equiv t.$$

Уравнение (1.1) после подстановки выражения для G_{in} примет вид

$$\frac{G_{\min} + it}{1 + itG_{\min}} + iY = 1.$$

Разделяя действительную и мнимую части уравнения, получим систему из двух уравнений относительно двух неизвестных параметров Y и t . Решения системы выражаются формулами

$$Y_{1,2} = \pm \left(\sqrt{G_{\min}} - \frac{1}{\sqrt{G_{\min}}} \right) = \pm \left(\sqrt{\rho} - \frac{1}{\sqrt{\rho}} \right); \quad (1.3)$$

$$t_{1,2} = \pm \frac{1}{\sqrt{G_{\min}}} = \pm \frac{1}{\sqrt{\rho}}. \quad (1.4)$$

В окончательных выражениях была использована выведенная выше связь $G_{\min} = 1/Z_{\min} = \rho$. Подставляя тангенс вместо t , найдем расстояние от сечения с минимумом до сечения с диафрагмой:

$$\frac{l_{1,2}}{\lambda_B} = \pm \frac{1}{2\pi} \arctan \left(\frac{1}{\sqrt{\rho}} \right). \quad (1.5)$$

Таким образом, по значению КСВ можно рассчитать согласующую проводимость и определить сечение, в котором её нужно установить. КСВ является экспериментально измеряемым параметром, а необходимый расчет осуществляется по формулам (1.3) и (1.5). Знаки $l_{1,2}$ указывают на то, в какую сторону от сечения с минимумом амплитуды стоячей волны необходимо устанавливать согласующий элемент. Элемент со значением $Y_1 > 0$ устанавливается между сечением с минимумом амплитуды и источником (СВЧ-генератором), а со значением $Y_2 < 0$ – между сечением с минимумом и нагрузкой. Конструкции диафрагм допускают оба знака (рис. 1.2).

Эквивалентные проводимости симметричных диафрагм индуктивного (рис. 1.2, а) и емкостного типов (рис. 1.2, б) являются чисто реактивными и описываются формулами (при $d \ll \lambda_B$):

$$Y_L = -\frac{\lambda_B}{a} \cot^2 \left(\frac{\pi a'}{2a} \right); \quad Y_C = \frac{4b}{\lambda_B} \ln \left[\operatorname{cosec} \left(\frac{\pi b'}{2b} \right) \right]. \quad (1.6)$$

(Напомним, что $\cot(x) = 1/\tan(x)$ и $\operatorname{cosec}(x) = 1/\sin(x)$.)

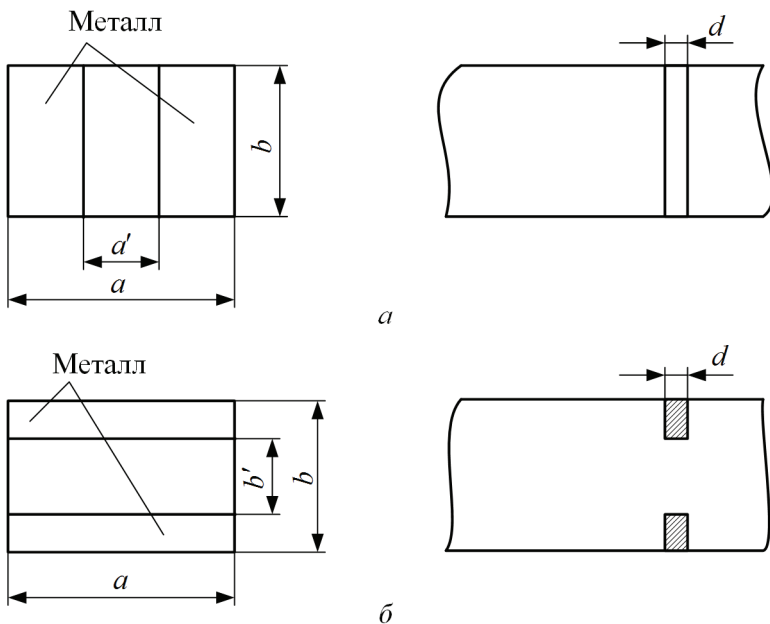


Рис. 1.2. Симметричные диафрагмы: *a* – индуктивная; *б* – ёмкостная

3. Задание для самостоятельного выполнения

Рассчитать размеры согласующих диафрагм (симметричных емкостной и индуктивной) в прямоугольном волноводе. Исходные данные приведены в табл. 1.1. Полагая допустимое рассогласование равным $\delta\rho = 0,05$, для индуктивной диафрагмы рассчитать погрешность координаты размещения $\delta(l)$ при точном изготовлении диафрагмы ($\delta a' = 0$) и погрешность размера $\delta a'$ при точном размещении ($\delta(l) = 0$).

4. Указания по расчету размеров согласующих диафрагм и координаты их установки

Рассмотрим нагрузку, формирующую в волноводе стоячую волну с КСВ $\rho_0 = 1,3$.

Подставляя ρ_0 в (1.3) и (1.5), найдем: $Y_{1,2} \approx \pm 0,26$; $l_{1,2}/\lambda_B \approx \pm 0,11$.

Вычислим размеры согласующих диафрагм в волноводном тракте сечением $a \times b = 23 \times 10 \text{ мм}^2$, подключенном к генератору с частотой $f = 10 \text{ ГГц}$.

Из теории прямоугольных волноводов известно, что длина волны основного типа H_{10} определяется формулой

$$\lambda_B = \frac{\lambda}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}},$$

где $\lambda = \frac{c}{f}$ – длина электромагнитной волны в свободном пространстве, c – скорость света. Подставляя значения, получим:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^{11}}{10^{10}} = 30 \text{ мм}; \quad \lambda_B = \frac{30}{\sqrt{1 - (30/2 \cdot 23)^2}} = 39,6 \text{ мм}.$$

Используя ранее выполненный расчет, полагаем $Y_C = Y_1 = 0,26$ и $Y_L = Y_2 = -0,26$. После подстановок значений параметров в формулы (1.6), получим уравнения:

$$0,26 = \frac{39,6}{23} \cot^2 \left(\frac{\pi a'}{2 \cdot 23} \right); \quad 0,26 = \frac{4 \cdot 10}{39,6} \ln \left[\operatorname{cosec} \left(\frac{\pi b'}{2 \cdot 10} \right) \right].$$

Отсюда находим $a' = 17,6$ мм и $b' = 5,6$ мм.

Обе диафрагмы должны быть расположены на одинаковом удалении $l \approx 0,11 \lambda_B \approx 4,4$ мм от сечения с минимумом амплитуды стоячей волны, причем емкостная – в направлении к генератору, а индуктивная – к нагрузке.

Отметим, что емкостная диафрагма уменьшает электрическую прочность волновода, так что при передаче по волноводу больших мощностей предпочтение отдают индуктивной диафрагме.

Выясним вопрос о допустимой погрешности изготовления и размещения диафрагм.

5. Указания по расчету погрешностей

При отклонении от точных значений, определяемых формулами (1.3) и (1.5), появляются погрешность δY и, согласно (1.1), (1.2), погрешность δG . Вблизи режима согласования имеем:

$$\rho = 1 + \delta \rho;$$

$$|\Gamma| = \delta |\Gamma|;$$

$$G = 1 + \delta(\operatorname{Re} G) + i\delta(\operatorname{Im} G).$$

Формулы $\rho = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}$ и $|\Gamma| = \frac{1-G}{1+G}$ позволяют связать малые отклонения параметров между собой

$$(\delta\rho)^2 = [\delta(\operatorname{Re}G)]^2 + [\delta(\operatorname{Im}G)]^2. \quad (1.7)$$

Расчет $\delta(\operatorname{Re}G)$ и $\delta(\operatorname{Im}G)$ выполним на основе связей (1.1), (1.2) и равенства $G_{\min} = \rho_0$:

$$\delta(\operatorname{Re}G) = \pm \frac{2(1-\rho_0)}{\sqrt{\rho_0}} \delta(kl);$$

$$\delta(\operatorname{Im}G) = \pm \frac{(1-\rho_0)^2}{\rho_0} \delta(kl) + \delta Y.$$

Подстановка данных выражений в (1.7) даёт

$$(\delta\rho)^2 = \frac{(1-\rho_0)^2}{\rho_0} \left[4 + \frac{(1-\rho_0)^2}{\rho_0} \right] [\delta(kl)]^2 + \frac{2(1-\rho_0)^2}{\rho_0} \delta(kl)\delta Y + (\delta Y)^2. \quad (1.8)$$

Расчёт δY выполним для диафрагмы индуктивного типа (рис. 1.3). За основу возьмем формулу

$$Y_L = -\frac{\lambda_B}{a} \left[\frac{1}{\sin^2\left(\frac{\pi a'}{2a}\right) \sin^2\left(\frac{\pi \xi_0}{a}\right)} - 1 \right].$$

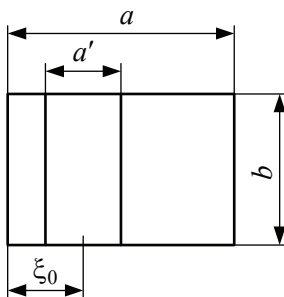


Рис. 1.3. Индуктивная диафрагма

Источниками погрешности Y_L будут погрешности размера a' и координаты центра окна ξ_0 (соответственно параметры $\delta a'$ и $\delta \xi_0$):

$$\delta Y_L = \frac{\partial Y_L}{\partial a'} \delta a' + \frac{\partial Y_L}{\partial \xi_0} \delta \xi_0.$$

Для симметричной диафрагмы, когда $\xi_0 = a/2$, имеем

$$\frac{\partial Y_L}{\partial \xi_0} = 0; \quad Y_L = -\frac{\lambda_B}{a} \cot^2 \left(\frac{\pi a'}{2a} \right).$$

Тогда

$$\delta Y = \pi \left(\frac{\lambda_B}{a} + \sqrt{\rho_0} - \frac{1}{\sqrt{\rho_0}} \right) \sqrt{\frac{a}{\lambda_B} \left(\sqrt{\rho_0} - \frac{1}{\sqrt{\rho_0}} \right)} \frac{\delta a'}{a}. \quad (1.9)$$

Подстановка формулы (1.9) в (1.8) приводит к следующим выражениям:

$$(\delta \rho)^2 = A \left[\frac{2\pi \delta(l)}{\lambda_B} \right]^2 + B \left[\frac{2\pi \delta(l)}{\lambda_B} \right] \frac{\delta a'}{a} + C \left(\frac{\delta a'}{a} \right)^2;$$

$$A = \frac{(1-\rho_0)^2}{\rho_0} \left[4 + \frac{(1-\rho_0)^2}{\rho_0} \right];$$

$$B = \frac{2(1-\rho_0)^2}{\rho_0} \pi \left(\frac{\lambda_B}{a} + \sqrt{\rho_0} - \frac{1}{\sqrt{\rho_0}} \right) \sqrt{\frac{a}{\lambda_B} \left(\sqrt{\rho_0} - \frac{1}{\sqrt{\rho_0}} \right)};$$

$$C = \pi^2 \left(\frac{\lambda_B}{a} + \sqrt{\rho_0} - \frac{1}{\sqrt{\rho_0}} \right)^2 \frac{a}{\lambda_B} \left(\sqrt{\rho_0} - \frac{1}{\sqrt{\rho_0}} \right).$$

Для значений $\rho_0 = 1,3$; $a = 23$ мм; $\lambda_B = 39,6$ мм получим

$$(\delta \rho)^2 = 0,282 \cdot \left[\frac{2\pi \delta(l)}{\lambda_B} \right]^2 + 0,331 \cdot \left[\frac{2\pi \delta(l)}{\lambda_B} \right] \frac{\delta a'}{a} + 5,94 \left(\frac{\delta a'}{a} \right)^2.$$

Зададим допустимое рассогласование значением $\delta \rho = 0,05$. Тогда при точном изготовлении диафрагмы, когда $\delta a' = 0$, получим $\delta(l) \approx 0,59$ мм. В другом крайнем случае – при точном размещении вдоль оси волновода – полагаем $\delta(l) = 0$, и для погрешности размера a' получим $\delta a' = a(\delta \rho) / \sqrt{5,94} \approx 0,47$ мм.

6. Форма отчета по заданию

- ◆ Сформулировать задание и привести исходные данные;
- ◆ привести рисунки диафрагм и расчетные формулы с расшифровкой использованных обозначений;
- ◆ привести рассчитанные значения $l, a', b', \delta a', \delta(l)$.

7. Контрольные вопросы

1. Какая нагрузка называется согласованной и какое у нее эквивалентное сопротивление?
2. Что такое КСВ и как он связан с коэффициентом отражения?
3. На конце волновода расположена согласованная нагрузка, а перед ней диафрагма с реактивной проводимостью iY . Сечение с СВЧ-генератором находится на расстоянии l/λ_v от диафрагмы. Каким будет общее сопротивление, подключенное к генератору?

Таблица 1.1

Исходные данные

№ варианта	КСВ	Тип волновода	a , мм	b , мм	f , ГГц
1	2,15	МЭК-18	129,54	64,77	1,8
2	2,10	МЭК-22	109,44	54,61	2,2
3	2,05	МЭК-26	86,36	43,18	2,6
4	2,00	МЭК-32	72,14	34,04	3,2
5	1,95	МЭК-40	58,17	29,083	4,0
6	1,90	МЭК-48	47,55	22,149	4,8
7	1,85	МЭК-58	40,39	20,193	5,8
8	1,80	МЭК-70	34,85	15,799	7,0
9	1,75	МЭК-84	28,499	12,624	8,4
10	1,70	МЭК-120	19,050	9,525	12
11	1,65	МЭК-140	15,799	7,899	14
12	1,60	МЭК-180	12,954	6,477	18
13	1,55	МЭК-220	10,668	5,318	22
14	1,50	МЭК-260	8,636	4,318	26
15	1,45	МЭК-320	7,112	3,556	32
16	1,40	МЭК-400	5,690	2,845	40
17	1,35	МЭК-500	4,775	2,388	50
18	1,25	МЭК-620	3,759	1,880	62
19	1,20	МЭК-740	3,099	1,549	74
20	1,15	МЭК-900	2,540	1,270	90

ТЕМА № 2. ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СОГЛАСУЮЩИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ПРОВОДИМОСТЕЙ

1. Цель упражнения

Освоение метода расчета параметров согласующих элементов СВЧ-линии с помощью диаграммы Вольперта–Смита.

2. Основные теоретические сведения

Из теории длинных линий известно, что в нагруженной линии коэффициент отражения гармонического сигнала (Γ) и входное сопротивление (Z) в любом сечении связаны соотношением (сопротивление выражено в единицах характеристического сопротивления линии)

$$\Gamma = \frac{Z - 1}{Z + 1}.$$

Данное соотношение преобразует сетку из прямых линий (рис. 2.1), расположенных в плоскости комплексных значений сопротивления $Z = R + iX$ (речь идет о прямых линиях с постоянными значениями активной $R = \text{const}$ и реактивной $X = \text{const}$ составляющих) в сетку окружностей, расположенных в плоскости комплексных значений $\Gamma = \Gamma' + i\Gamma''$ (рис. 2.2). При этом уравнения окружностей имеют вид:

$$\left(\Gamma' - \frac{R}{R+1}\right)^2 + (\Gamma'')^2 = \frac{1}{(R+1)^2}; \quad (\Gamma' - 1)^2 + \left(\Gamma'' - \frac{1}{X}\right)^2 = \frac{1}{X^2}.$$

Так как $|\Gamma| \leq 1$, то физически реализуемые значения Γ будут находиться внутри круга единичного радиуса $|\Gamma| = 1$. Дуги построенной по уравнениям сетки окружностей, расположенных в области $|\Gamma| \leq 1$, образуют номограмму, получившую название диаграммы Вольперта–Смита.

Диаграмма позволяет осуществлять графический расчет сопротивления передающей линии в любом сечении. Теоретической основой такого расчета является закон изменения коэффициента отражения при перемещении вдоль линии:

$$\Gamma(l + \Delta l) = \Gamma(l) \exp(-2ik\Delta l),$$

где l и $l + \Delta l$ – координаты исходного и конечного сечений ($\Delta l > 0$ при удалении от нагрузки к генератору), $k = 2\pi/\lambda_{\text{в}}$ – волновое число ($\lambda_{\text{в}}$ – длина волны в линии на частоте генератора).

Из формулы следует, что при переходе от одного сечения к другому радиус-вектор, соответствующий комплексному коэффициенту отражения Γ , поворачивается на угол $\varphi = 2kl\Delta l$. При этом сетка на номограмме позволяет каждому радиусу-вектору сопоставить значения R и X . Возможно и обратное сопоставление. В частности, если исходное сечение выбрано в плоскости соединения с нагрузкой, то, используя сетку и по значениям R и X нагрузки, можно построить точку. Радиус-вектор, проведенный к этой точке из центра диаграммы, будет графическим выражением коэффициента отражения от нагрузки. Окружность, полученная поворотом радиуса-вектора, определит все наборы значений R и X , которые может иметь передающая линия с данной нагрузкой (пунктирная окружность на рис. 2.2).

Можно было бы связать значения сопротивления в двух сечениях с помощью известной из теории длинных линий формулы (сопротивление дано в единицах характеристического сопротивления линии)

$$Z(l + \Delta l) = \frac{Z(l) + i \tan(k\Delta l)}{1 + iZ(l)\tan(k\Delta l)}.$$

Разделяя в формуле действительную и мнимую части, можно получить законы преобразования R и X . Однако в решении вопросов согласования нагрузки и передающей линии наглядность графического расчета делает его более предпочтительным.

Эта же диаграмма может быть использована и для расчета проводимостей. Преобразованию сопротивления в проводимость ($Z \rightarrow 1/Z$) соответствует переход в диаметрально противоположную точку диаграммы ($\Gamma \rightarrow \Gamma \exp(i\pi)$). Действительно, приведенное в начале раздела соотношение между Γ и Z можно переписать в виде

$$\Gamma \exp(i\pi) = \frac{(1/Z) - 1}{(1/Z) + 1}.$$

Таким образом, простота закона преобразования коэффициента отражения при движении вдоль передающей линии (поворот радиуса-вектора Γ) и возможность связать коэффициент отражения с входным сопротивлением нагруженной линии (с помощью сетки из дуг окружностей) позволяют производить графический расчет согласующих элементов волноводного тракта. Отметим, что режиму согласования соответствует значение $\Gamma = 0$, и на диаграмме этот режим изобража-

ется точкой, расположенной в центре диаграммы на пересечении окружностей, соответствующих значениям $R=1$ и $X=0$.

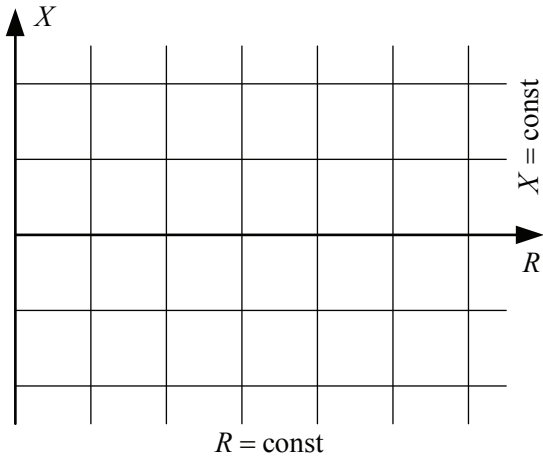


Рис. 2.1. Прямые линии в плоскости комплексного сопротивления, преобразуемые в окружности в плоскости комплексного коэффициента отражения

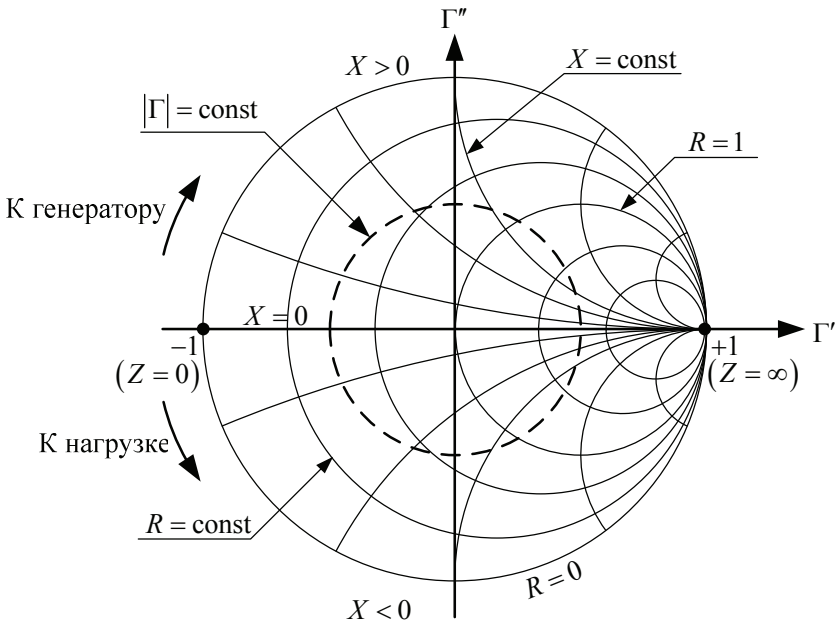


Рис. 2.2. Диаграмма Вольперта–Смита

Расчеты в заданиях необходимо выполнить с помощью круговой диаграммы полных сопротивлений и проводимостей.

3. Задание для самостоятельного выполнения № 1

В конце волновода расположена согласованная нагрузка и диафрагма с реактивной проводимостью iY . Найти КСВ волновода и входное сопротивление на расстоянии $l/\lambda_{\text{в}}$ от диафрагмы. Исходные данные приведены в табл. 2.1.

3.1. Указания к последовательности построений

Пример выполнения построений приведен на рис. 2.3.

Точка 1 нанесена по значению проводимости в том сечении волновода, в котором установлена диафрагма $G = G_{\text{согл}} + G_{\text{диафр}} = 1 + iY$.

Окружность с центром в середине диаграммы и проходящая через точку 1 определяет на пересечении с радиусом $0 \leq \Gamma' \leq 1$ значение КСВ.

Перемещение в точку 2 преобразует проводимость в сопротивление $G \rightarrow Z = 1/G$.

Точка 3 удалена от точки 2 (в направлении к генератору) на $l/\lambda_{\text{в}}$.

Координаты точки 3, определяемые по диаграммной сетке, дают искомое $Z_{\text{вх}}$.

3.2. Форма отчета по заданию

- ◆ Сформулировать задание и привести исходные данные;
- ◆ привести диаграмму (максимально возможного размера на листе А4), на которой выполнить построения необходимых линий и обозначить нумерованными точками «маршрут» перемещения;
- ◆ описать и обосновать шаги построения;
- ◆ привести полученные значения КСВ и сопротивления.

4. Задание для самостоятельного выполнения № 2

В СВЧ-линии известен КБВ (коэффициент бегущей волны) и расстояние от нагрузки до одного из минимумов стоячей волны ($l_{\text{мин}}/\lambda_{\text{в}}$). Определить согласующую реактивную проводимость и место ее включения (т. е. расстояние от нагрузки). Исходные данные приведены в табл. 2.1.

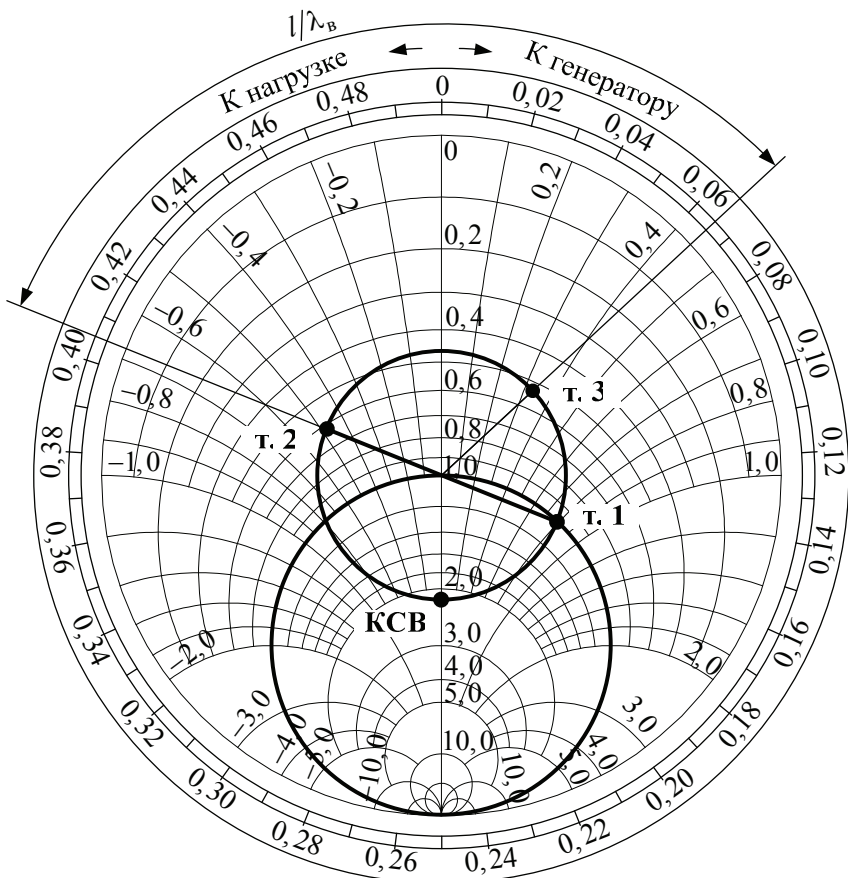


Рис. 2.3. Построения, выполняемые в задании № 1

4.1. Указания к последовательности построений

Пример выполнения построений приведен на рис. 2.4.

Точка 1 задана значением КБВ.

Точка 2 удалена от точки 1 на l_{\min}/λ_g (в направлении к нагрузке) и ее «сеточные» координаты определяют комплексное сопротивление нагрузки Z_n .

Переходом в точку 3 сопротивление преобразуется в проводимость $Z_n \rightarrow G_n = 1/Z_n$.

Перемещение в точку 4 меняет активную часть проводимости до нужного единичного значения $G_n \rightarrow 1 + Y_4$.

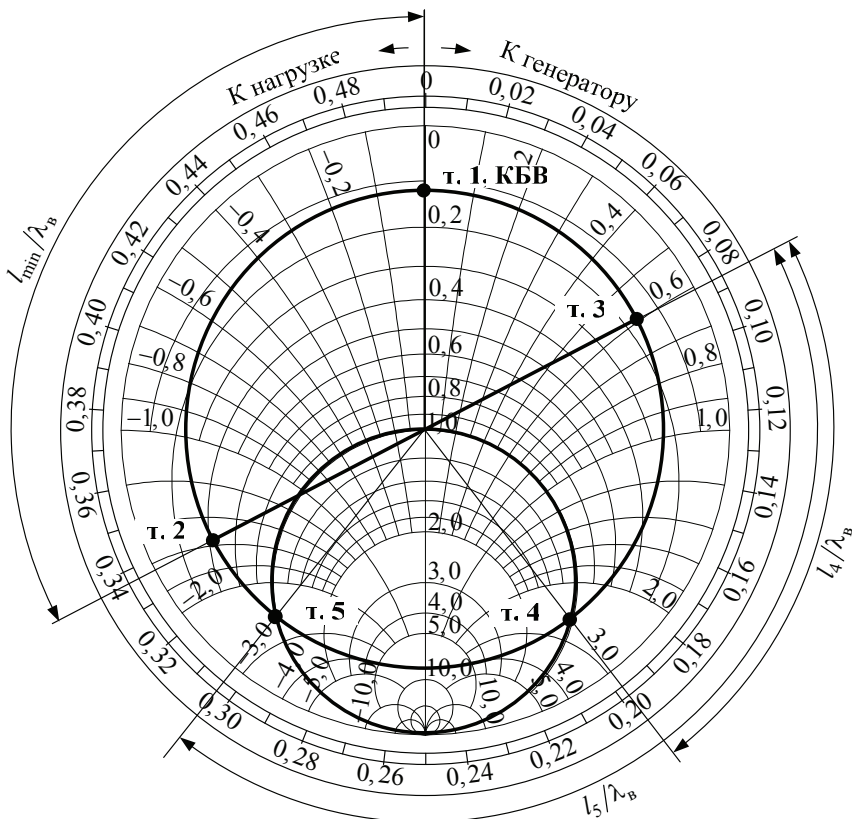


Рис. 2.4. Построения, выполняемые в задании № 2

По значению Y_4 определяется согласующая проводимость $iY_{\text{согл}} = -iY_4$. Размещение в волноводе элемента с проводимостью $iY_{\text{согл}}$ позволит преобразовать значение $(1 + iY_4)$ в согласованное значение «1» (путем сложения проводимостей).

Таким образом, длина дуги $l_4/\lambda_{\text{в}}$ определяет искомое расстояние от нагрузки до места размещения согласующего элемента.

Возможен также вариант перемещения из точки 3 в точку 5 ($G_{\text{н}} \rightarrow 1 + Y_5$). В этом случае согласующая проводимость будет иметь значение $iY_{\text{согл}} = -iY_5$. Причем $Y_5 = -Y_4$. Дуга $l_5/\lambda_{\text{в}}$ определяет то расстояние, на котором необходимо разместить согласующий элемент.

4.2. Форма отчета по заданию

- ◆ Сформулировать задание и привести исходные данные;
- ◆ привести диаграмму, на которой выполнить необходимые построения (как в предыдущем задании);
- ◆ описать и обосновать шаги построения;
- ◆ привести полученные значения согласующих проводимостей (с разными знаками) и соответствующих расстояний до нагрузки.

5. Задание для самостоятельного выполнения № 3

В конце волноводного тракта включена нагрузка с известным сопротивлением Z_n (табл. 2.1). Для согласования в тракт включен волноводный тройник с короткозамыкающим поршнем в ответвлении. Определить место включения (расстояние от нагрузки l_1/λ_v) и глубину погружения поршня (l_2/λ_v) для двух типов тройников.

5.1. Указания к последовательности построений

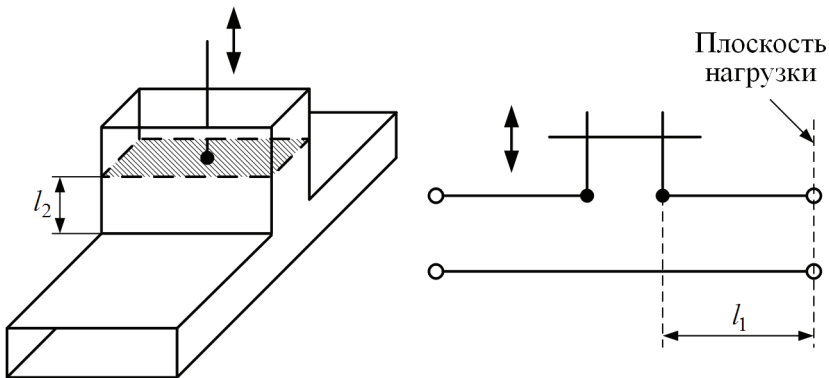


Рис. 2.5. Тройник с последовательной схемой замещения

5.1.1. Построения для тройника с последовательной схемой замещения (рис. 2.5)

Пример выполнения построений приведен на рис. 2.6.

Точка 1 наносится по значениям активной и реактивной составляющих Z_n .

Перемещением в точку 2 осуществляется преобразование активной части сопротивления в нужное единичное значение $Z_n \rightarrow 1 + iX$. Точка 3 определяет реактивную составляющую iX . Согласующий элемент

должен иметь сопротивление $Z_{\text{согл}} = -iX$. Это значение отмечено точкой 4.

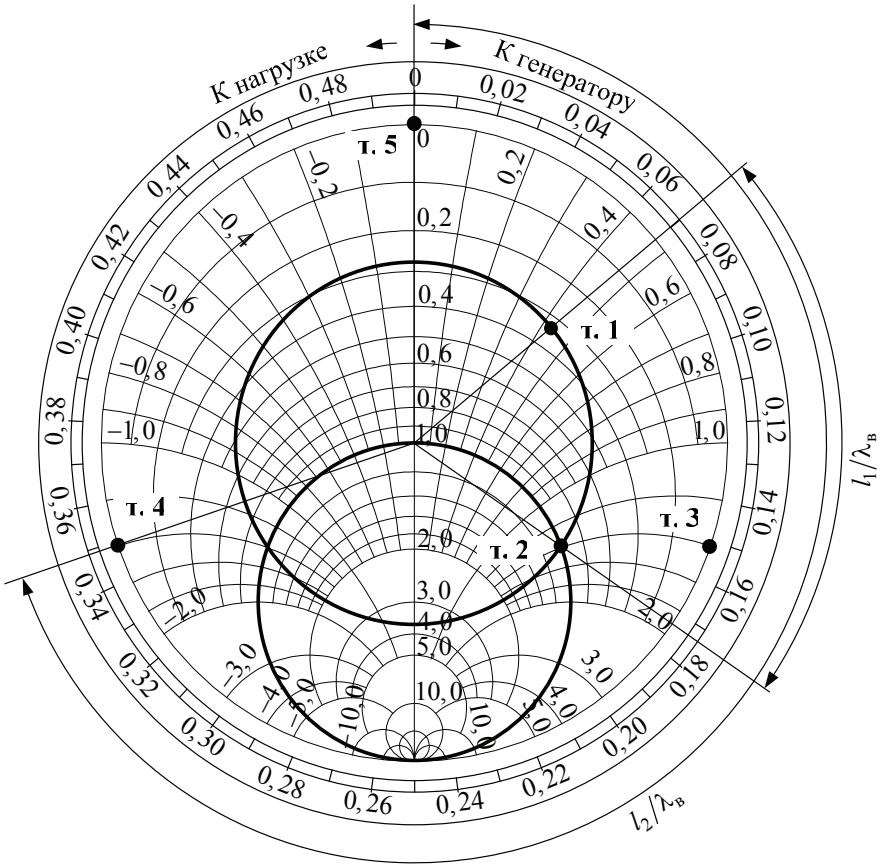


Рис. 2.6. Построения, выполняемые для последовательной схемы

Итак, чтобы ответвление выполняло функцию согласования, оно должно отстоять от нагрузки на расстояние, определяемое дугой $l_1/\lambda_{\text{в}}$, и иметь входное реактивное сопротивление, определяемое точкой 4. Поскольку ответвление нагружено на сопротивление $Z = 0$ (точка 5), то, чтобы преобразовать его в значение, отмеченное точкой 4, необходимо правильно разместить поршень. На рис. 2.6 длина дуги $l_2/\lambda_{\text{в}}$ определяет искомую глубину погружения поршня.

5.1.2. Построения для тройника с параллельной схемой замещения (рис. 2.7)

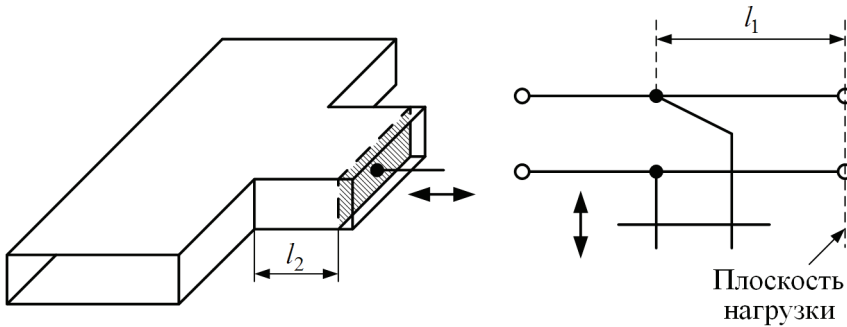


Рис. 2.7. Тройник с параллельной схемой замещения

Пример выполнения построений приведен на рис. 2.8.

Координаты точки 1 заданы исходным комплексным сопротивлением Z_H .

Переходом в точку 2 осуществляется преобразование сопротивления в проводимость $Z_H \rightarrow 1/G_H$.

Переходом из точки 2 в точку 3 (по направлению к генератору) достигается преобразование проводимости в значение $G_H \rightarrow 1 + iY$ с «несогласованной» реактивной частью iY (точка 4). Согласующая реактивная проводимость должна иметь значение $G_{\text{согл}} = -iY$ (точка 5). Итак, дуга l_1/λ_B задает расстояние от нагрузки до ответвления.

Точка 6 изображает проводимость поршня в ответвлении (точка с бесконечной проводимостью). Перемещение из точки 6 в точку 5 преобразует $G_{\text{поршня}} = \infty$ в необходимое $G_{\text{согл}}$. Таким образом, длина дуги l_2/λ_B и будет определять глубину погружения поршня.

5.2. Форма отчета по заданию

- ◆ Сформулировать задание и привести исходные данные;
- ◆ привести диаграмму, на которой выполнить необходимые построения;
- ◆ описать и обосновать шаги построения;
- ◆ привести полученные значения $l_{1,2}/\lambda_B$.

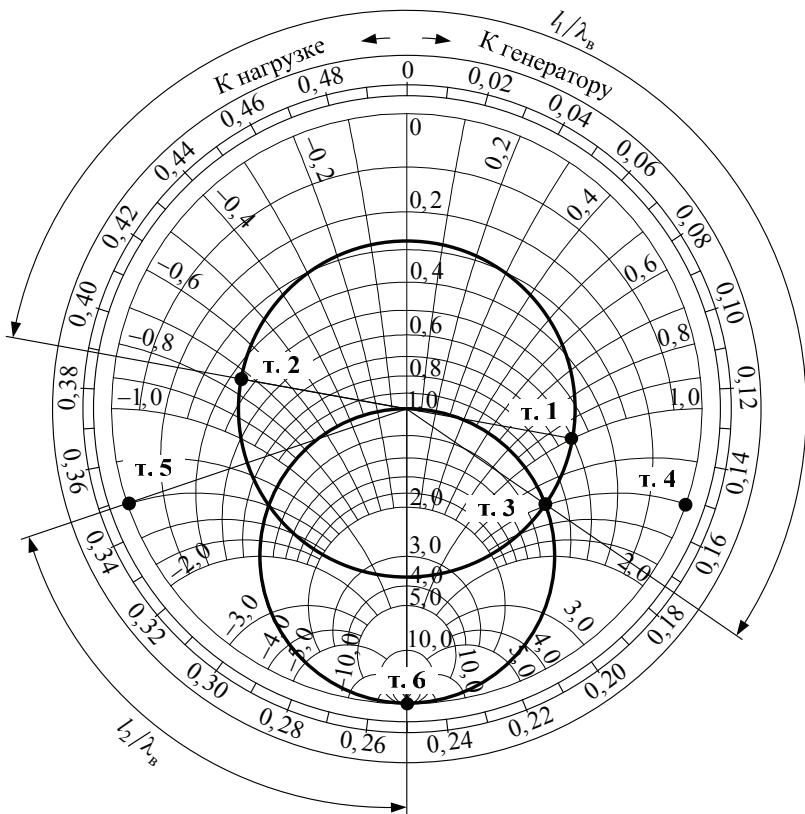


Рис. 2.8. Построения, выполняемые для параллельной схемы

6. Контрольные вопросы

1. Каков принцип построения диаграммы Вольперта–Смита?
2. Что представляет собой линия постоянного значения КСВ?
3. Каким образом на диаграмме осуществляется переход от сопротивлений к проводимостям?
4. Где находится точка согласованного режима?
5. Как на диаграмме изображаются сечения с минимумом амплитуды стоячей волны?
6. Докажите, что на диаграмме любая пара окружностей с $R = \text{const}$ и $X = \text{const}$ пересекаются между собой под прямым углом. Докажите, что любые пересекающиеся в плоскости Z кривые сохраняют угол между собой в точке пересечения при их преобразовании в плоскость Γ .

Исходные данные для заданий

№ варианта	Задание № 1		Задание № 2		Задание № 3
	Y	l/L_B	КБВ	l_{\min}/L_B	Z_H
1	0,7	0,07	0,1	0,04	$0,2 + i0,02$
2	0,8	0,08	0,2	0,06	$0,2 + i0,4$
3	0,9	0,09	0,3	0,08	$0,3 + i0,2$
4	1,0	0,10	0,4	0,10	$0,3 + i0,4$
5	1,2	0,12	0,5	0,12	$0,4 + i0,4$
6	1,4	0,07	0,1	0,14	$0,4 + i0,5$
7	1,6	0,08	0,2	0,16	$0,4 + i0,6$
8	1,8	0,09	0,3	0,18	$0,4 + i0,7$
9	2,0	0,10	0,4	0,20	$0,4 + i0,8$
10	3,0	0,12	0,5	0,22	$0,4 + i0,9$
11	-0,7	0,07	0,1	0,28	$0,2 - i0,2$
12	-0,8	0,08	0,2	0,30	$0,2 - i0,4$
13	-0,9	0,09	0,3	0,32	$0,3 - i0,2$
14	-1,0	0,10	0,4	0,34	$0,3 - i0,4$
15	-1,2	0,12	0,5	0,36	$0,4 - i0,4$
16	-1,4	0,07	0,1	0,38	$0,4 - i0,5$
17	-1,6	0,08	0,2	0,40	$0,4 - i0,6$
18	-1,8	0,09	0,3	0,42	$0,4 - i0,7$
19	-2,0	0,10	0,4	0,44	$0,4 - i0,8$
20	-3,0	0,12	0,5	0,46	$0,4 - i0,9$

ТЕМА № 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ

1. Цель упражнения

Освоение метода расчета законов дисперсии волновых мод и определение рабочего интервала частот в прямоугольном волноводе.

2. Основные теоретические сведения

Сравним между собой дисперсионные характеристики электромагнитных волн, распространяющихся в свободном пространстве и в волноводе. В свободном пространстве электромагнитные волны являются поперечными. Их круговая частота ω и модуль волнового вектора $|k|$ связаны соотношением: $\omega = c|k|$, где c – скорость света.

Прямоугольный волновод характеризуется многомодовостью. Законы дисперсии распространяющихся волн имеют вид

$$\omega_{m,n}^2 = c^2 \left(|k|^2 + \kappa_{m,n}^2 \right), \quad (3.1)$$

где $\kappa_{m,n}^2 = \pi^2 \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)$ и $m, n = 0, 1, 2, \dots$ – целые числа, обозначающие тип волны (причем хотя бы одно из них не равно нулю), $a \times b$ – размеры поперечного сечения волновода ($a > b$).

Из выражения (3.1) следует, что, в отличие от свободного пространства, в волноводе не могут распространяться сигналы с частотами ниже, чем значение $\omega_{1,0}$, рассчитанное для $|k|=0$. Вместе с тем сигнал с большим значением частоты может передаваться сразу несколькими типами волн. При этом у каждого типа волны будет свое значение $|k|$. Кроме того, волна в волноводе может иметь продольную составляющую напряженности электрического либо магнитного поля (соответственно E_{mn} и H_{mn} типы волн).

3. Задание для самостоятельного выполнения

Рассчитать дисперсионные зависимости для волн $H_{10}, H_{20}, H_{01}, E_{11}, E_{21}$ в прямоугольном волноводе с заданными размерами сечения (варианты согласно табл. 3.1).

4. Указания по выполнению задания и оформлению отчета

Пример оформления графиков дисперсионных зависимостей приведен на рис. 3.1. В волноводе $k||z$, где z – координатная ось, направленная вдоль волновода. Тогда волновой вектор полностью задается своей проекцией k_z , причем $|k|=|k_z|$, а направление k определено знаком k_z . Зависимости на рис. 3.1 для придания им симметричного вида построены в интервале значений k_z с обоими знаками.

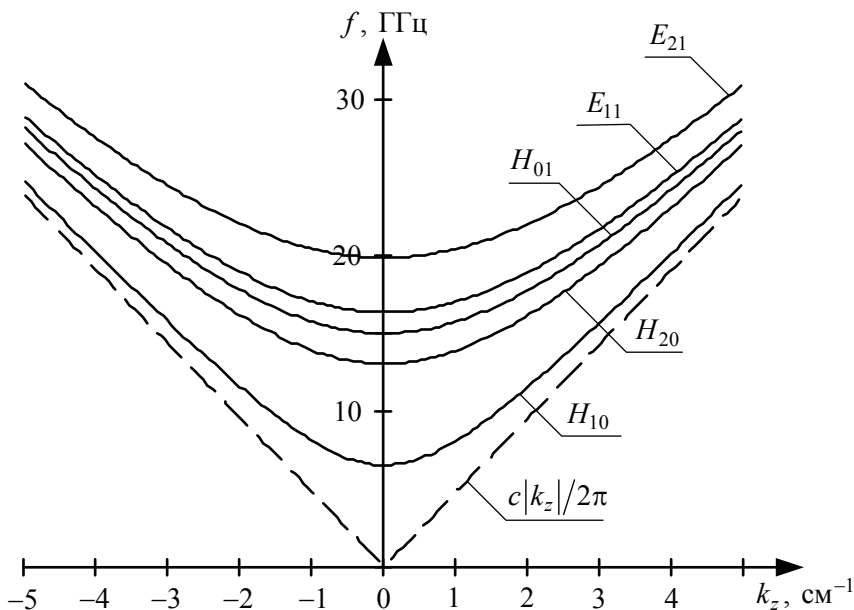


Рис. 3.1. Дисперсионные зависимости распространяющихся волн в прямоугольном волноводе с размерами сечения $a \times b = 23 \times 10$ мм²

В отчет включить графики зависимостей частот $f_{m,n} = \omega_{m,n}/2\pi$ от k_z и рассчитанные значения нижних граничных частот для перечисленных в задании типов волн. Пунктиром построить график дисперсионной зависимости для электромагнитных волн в свободном пространстве $f = c|k_z|/2\pi$. Интервал значений k_z выбрать таким, чтобы было видно асимптотическое сближение всех построенных зависимостей с дисперсионной зависимостью волн в свободном пространстве.

Указать единицы измерения частоты и волнового числа. Отдельным неравенством указать частотный интервал, в котором распространяется только один тип волны (низшая мода H_{10}).

Таблица 3.1

Исходные данные

№ варианта	Тип волновода	a , мм	b , мм
1	МЭК-18	129,54	64,77
2	МЭК-22	109,44	54,61
3	МЭК-26	86,36	43,18
4	МЭК-32	72,14	34,04
5	МЭК-40	58,17	29,083
6	МЭК-48	47,55	22,149
7	МЭК-58	40,39	20,193
8	МЭК-70	34,85	15,799
9	МЭК-84	28,499	12,624
10	МЭК-120	19,050	9,525
11	МЭК-140	15,799	7,899
12	МЭК-180	12,954	6,477
13	МЭК-220	10,668	5,318
14	МЭК-260	8,636	4,318
15	МЭК-320	7,112	3,556
16	МЭК-400	5,690	2,845
17	МЭК-500	4,775	2,388
18	МЭК-620	3,759	1,880
19	МЭК-740	3,099	1,549
20	МЭК-900	2,540	1,270

5. Контрольные вопросы

1. Чем обусловлен выбор рабочего интервала частот в волноводе?
2. Как классифицируются волны в прямоугольном волноводе?
3. Сколько типов волн могут распространяться в волноводе $a \times b = 23 \times 10 \text{ мм}^2$ на частоте 18 ГГц (рис. 3.1)? Как рассчитать длины этих волн?

ТЕМА № 4. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ В СВЧ-ПЕРЕДАЮЩЕЙ ЛИНИИ

1. Цель упражнения

Освоение метода определения комплексного сопротивления нагрузки по параметрам стоячей волны H_{10} -типа в прямоугольном волноводе.

2. Основные теоретические сведения

Волновой процесс, протекающий в передающей линии, заключается в распространении генерируемой и отраженной волн. При их сложении образуется стоячая волна.

Измерения параметров стоячей волны в прямоугольном волноводе производят с помощью зонда, погруженного внутрь волновода через щель, расположенную посередине широкой стенки. Высокочастотное напряжение с зонда поступает на детектирующий диод и далее на измерительный прибор. Отрезок волновода, по которому перемещается зонд, называется измерительной линией (рис. 4.1).

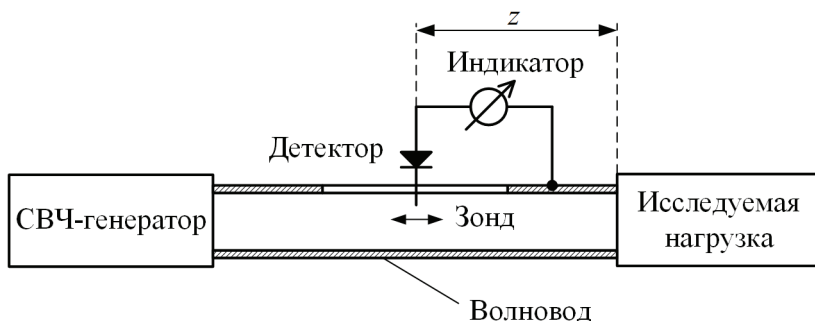


Рис. 4.1. Схема измерительной линии

Расположение щели для зонда выбрано, исходя из распределения СВЧ-тока в стенках волновода для волны основного типа (рис. 4.2). В середине широкой стенки поперечная составляющая тока равна нулю. Следовательно, узкая щель, прорезанная точно в середине широкой стенки, не приведет к перераспределению тока и не повлияет на структуру поля H_{10} -волны (рис. 4.3). Кроме того, в плоскости, перпендикулярной широким стенкам и проходящей вдоль щели, амплитуда напряженности электрического поля H_{10} -волны имеет макси-

мальное значение (рис. 4.4). Так что использование проволочного зонда позволяет с максимальной эффективностью регистрировать ЭДС, индуцируемую полем волны.

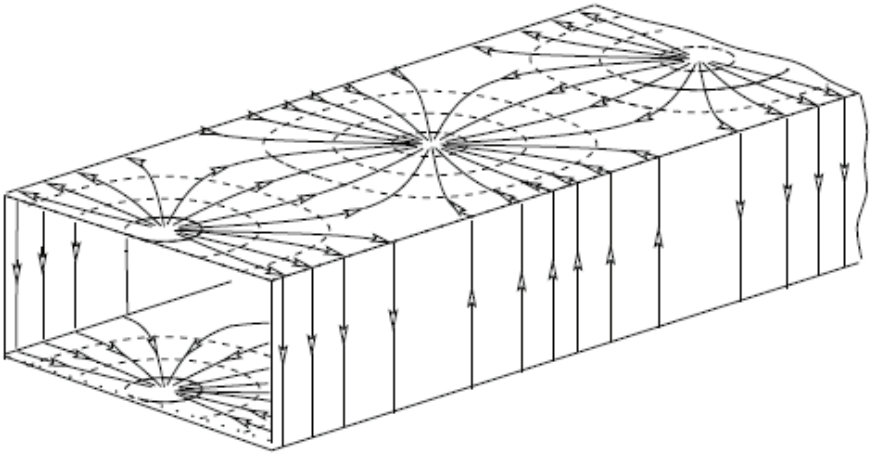


Рис. 4.2. Распределение поверхностных токов при распространении волны H_{10} -типа

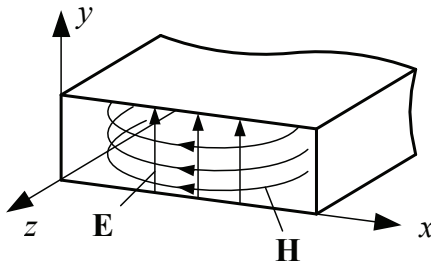


Рис. 4.3. Структура поля в H_{10} -волне

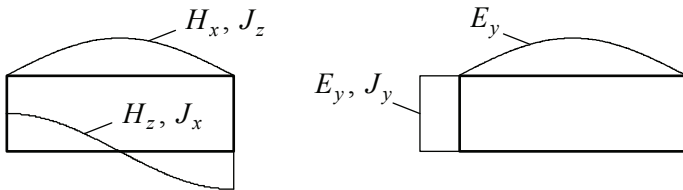


Рис. 4.4. Координатные зависимости компонент поля и тока в H_{10} -волне

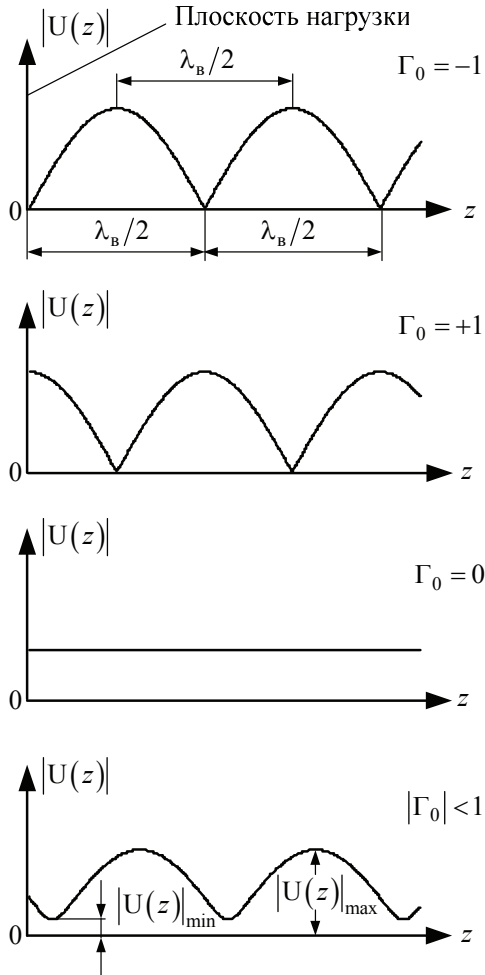


Рис. 4.5. Координатная зависимость амплитуды стоячей волны при различных значениях коэффициента отражения от нагрузки

Амплитуда стоячей волны $U(z)$, измеряемая зондом, является функцией расстояния от нагрузки и описывается выражением

$$\left| \frac{U(z)}{U_0} \right| = \left| 1 + \Gamma_0 \exp\left(-i \frac{4\pi z}{\lambda_B}\right) \right|, \quad (4.1)$$

где U_0 – амплитуда генерируемой волны; Γ_0 – комплексный коэффициент отражения волны от нагрузки; λ_B – длина волны в линии на

частоте генератора. Возможные конфигурации стоячей волны изображены на рис. 4.5. В частности, при включении короткозамкнутой нагрузки с $\Gamma_0 = -1$ амплитуда стоячей волны описывается синусоидальной зависимостью

$$\left| \frac{U(z)}{U_0} \right| = 2 \left| \sin \left(\frac{2\pi z}{\lambda_B} \right) \right|.$$

Из формулы (4.1) следует, что амплитуда имеет экстремумы в тех сечениях передающей линии, в которых выполняются равенства

$$\exp \left(i\varphi - i \frac{4\pi z_{\min}}{\lambda_B} \right) = -1; \quad \exp \left(i\varphi - i \frac{4\pi z_{\min}}{\lambda_B} \right) = 1,$$

где φ – фаза коэффициента отражения от нагрузки, $\Gamma_0 = |\Gamma_0| \exp(i\varphi)$, а z_{\min} и z_{\max} – координаты сечений с минимальными и максимальными значениями амплитуды. Тогда

$$\left| \frac{U(z)}{U_0} \right|_{\min} = 1 - |\Gamma_0|; \quad \left| \frac{U(z)}{U_0} \right|_{\max} = 1 + |\Gamma_0|.$$

Коэффициент стоячей волны (КСВ, ρ), рассчитываемый как отношение максимальной и минимальной амплитуд будет

$$\rho = \frac{1 + |\Gamma_0|}{1 - |\Gamma_0|}.$$

Приведенные соотношения позволяют выразить Γ_0 через z_{\min} и ρ :

$$\Gamma_0 = -\frac{\rho - 1}{\rho + 1} \exp \left(i \frac{4\pi z_{\min}}{\lambda_g} \right).$$

Вместе с тем нагрузку передающей линии можно характеризовать комплексным безразмерным сопротивлением, которое связано с Γ_0 формулой (особенности использования понятия сопротивления в волноводной линии обсуждались в теме № 1)

$$Z_H = \frac{1 + \Gamma_0}{1 - \Gamma_0}.$$

Подстановка выражения для Γ_0 и алгебраические преобразования дают

$$Z_H = \frac{1 - i\rho \tan(2\pi z_{\min}/\lambda_B)}{\rho - i \tan(2\pi z_{\min}/\lambda_B)}. \quad (4.2)$$

Таким образом, по значениям ρ и z_{\min} можно рассчитать сопротивление нагрузки. Оба параметра можно определить экспериментально с помощью измерительной линии. При этом ρ будет отношением максимального значения напряжения на зонде к минимальному при перемещении его вдоль щели.

Значение z_{\min} было введено как расстояние от нагрузки до сечения с минимумом амплитуды стоячей волны. Однако на практике вместо z_{\min} измеряют смещение сечения с минимумом при замене короткозамкнутой (КЗ) нагрузки на исследуемую. Обозначим это смещение как Δz_{\min} . Причем будем полагать $\Delta z_{\min} > 0$, если минимум сместился в направлении к генератору, и $\Delta z_{\min} < 0$ при смещении к нагрузке. Для КЗ-нагрузки сечения с минимумом имеют координаты $(z_{\min})_{КЗ} = (\lambda_B/2)n$, где $n = 0, 1, 2, \dots$. Тогда координату минимума для исследуемой нагрузки можно выразить в виде

$$z_{\min} = (\lambda_B/2)n + \Delta z_{\min}.$$

Подстановка в (4.2) дает

$$Z_H = \frac{1 \mp i\rho \tan(2\pi|\Delta z_{\min}|/\lambda_B)}{\rho \mp i \tan(2\pi|\Delta z_{\min}|/\lambda_B)}, \quad (4.3)$$

где знак « \mp » выбирается для $\Delta z_{\min} > 0$, а « \mp » – для $\Delta z_{\min} < 0$.

Фактически использование Δz_{\min} вместо z_{\min} основано на физической эквивалентности плоскости подключения КЗ-нагрузки и сечений с минимумами амплитуды стоячей волны – в этих местах волновода амплитуда имеет нулевое значение (см. первый график на рис. 4.5).

3. Задание для самостоятельного выполнения

По исходным данным из табл. 4.1 определить сопротивление нагрузки.

Исходные данные

№ варианта	КСВ	Тип волновода	a , мм	Δz , мм	Δz_{\min} , мм
1	2,15	МЭК-18	129,54	109	-36
2	2,10	МЭК-22	109,44	87	-14
3	2,05	МЭК-26	86,36	77	-26
4	2,00	МЭК-32	72,14	62	-10
5	1,95	МЭК-40	58,17	49	-16
6	1,90	МЭК-48	47,55	42	-6,9
7	1,85	МЭК-58	40,39	34	-11
8	1,80	МЭК-70	34,85	27	-4,5
9	1,75	МЭК-84	28,499	23	-7,6
10	1,70	МЭК-120	19,050	17	-2,8
11	1,65	МЭК-18	129,54	110	18
12	1,60	МЭК-22	109,44	88	29
13	1,55	МЭК-26	86,36	78	13
14	1,50	МЭК-32	72,14	62	20
15	1,45	МЭК-40	58,17	50	8,2
16	1,40	МЭК-48	47,55	41	14
17	1,35	МЭК-58	40,39	34	5,6
18	1,25	МЭК-70	34,85	27	9,0
19	1,20	МЭК-84	28,499	23	3,8
20	1,15	МЭК-120	19,050	16	5,5

4. Указания по выполнению задания

Рассмотрим в качестве примера прямоугольный волновод с размерами сечения $a \times b = 23 \times 10 \text{ мм}^2$, соединяющий генератор и нагрузку. Полагаем, что на частоте генератора может распространяться только волна H_{10} -типа. Допустим, что при подключении КЗ-нагрузки было измерено расстояние между соседними минимумами $\delta z = 20 \text{ мм}$ и зафиксировано положение одного из них. Далее при замене КЗ-нагрузки на исследуемую было измерено смещение минимума – оно оказалось равным $\Delta z_{\min} = 5 \text{ мм}$ в направлении к генератору. Кроме того, по значениям амплитуд в максимуме и минимуме был определен КСВ: $\rho = 1,3$.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Шостак А.С.* Антенны и устройства СВЧ. Часть 2. Антенны [Электронный ресурс]: учебное пособие / Шостак А.С. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 168 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/14004>.
2. *Замотринский В.А.* Устройства СВЧ и антенны. Часть 2. Антенны [Электронный ресурс]: учебное пособие / Замотринский В.А., Шангина Л.И. – Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 159 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/13997>.
3. Устройства СВЧ и антенны [Электронный ресурс]: учебник / Под ред. А.А. Филонова. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014. – 492 с. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=364513>.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕМА № 1. ДИАФРАГМЫ В ВОЛНОВОДЕ	3
ТЕМА № 2. ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ СОГЛАСУЮЩИХ СОПРОТИВЛЕНИЙ И ПРОВОДИМОСТЕЙ	13
ТЕМА № 3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ВОЛН В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ	24
ТЕМА № 4. СТОЯЧИЕ ВОЛНЫ В СВЧ-ПЕРЕДАЮЩЕЙ ЛИНИИ	27
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	34

**Владимир Васильевич Шагаев
Игорь Владимирович Чухраев**

**Проектирование линий передачи
СВЧ-диапазона**

Методические указания

Редактор *С.Н. Капранов*
Корректор *Т.В. Тимофеева*
Технический редактор *А.В. Бурмистров*

Подписано в печать 20.09.2016.
Формат 60×84/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Печ. л. 2,25. Усл. п. л. 2,09. Тираж 50 экз. Заказ № 38

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Изготовлено в редакционно-издательском отделе
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57–31–87